第 38 卷第 2 期
2018 年 1 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.2
Jan.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701080065
廖文婷,邓红兵,李若男,郑华.长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素:基于子流域尺度分析.生态学报,2018,38(2):412-420.
Liao W T, Deng H B, Li R N, Zheng H.Spatial patterns of ecosystem hydrological regulation services and factors affecting them in the Yangtze River Basin: sub-watershed scale analysis.Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):412-420.

长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素:基于子流域尺度分析

廖文婷[1,2],邓红兵[1,2],李若男[1,2],郑　华[1,2,*]
1 中国生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京　100085
2 中国科学院大学资源与环境学院,北京　100049

摘要:水文调节服务是流域生态系统所提供的重要服务之一,认识流域生态系统水文调节服务空间变异规律及其驱动力,对于流域生态系统保护与恢复、合理开发利用水资源具有重要意义。以洪涝灾害频发的长江流域为对象,运用变异系数法和多元统计方法,在子流域尺度上研究了长江流域生态系统水文调节服务空间特征及影响因素。结果表明,长江流域子流域生态系统水文调节服务呈现出明显的空间异质性,水利工程密集、自然植被覆盖率高达 71%的金沙江和汉江水系各子流域水文调节服务最强,降雨与径流变异系数差为 0.477;农田和人口密集的嘉陵江水系各子流域水文调节服务最弱,降雨与径流变异系数差为 -0.474,其他子流域水文调节服务作用不明显。影响水文调节服务的主要因素是:水库库容、自然植被面积比例、农田面积比例、单位面积人口数,其中:水库库容和自然植被面积比例对水文调节服务具有正向促进作用,农田面积比例和单位面积人口对水文调节服务的作用正好相反。水库库容对子流域生态系统水文调节服务空间异质性的贡献最大(58.85%)。上述结果有助于科学认识长江流域生态系统水文调节服务空间分异规律,可为制定不同子流域生态保护与恢复措施、提升子流域生态系统水文调节服务提供科学依据。

关键词:水文调节服务;变异系数法;生态系统服务;子流域尺度;长江流域

Spatial patterns of ecosystem hydrological regulation services and factors affecting them in the Yangtze River Basin: sub-watershed scale analysis

LIAO Wenting[1,2], DENG Hongbing[1,2], LI Ruonan[1,2], ZHENG Hua[1,2,*]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Hydrological regulation is one of the services provided by watershed ecosystems. For watershed ecosystem conservation and restoration and reasonable development of watershed water resources, it is important to identify the spatial pattern of watershed ecosystem hydrological regulation service and its driving forces. Many studies have been conducted at the ecosystem and landscape scale on the influence of different vegetation types and landscape patterns on hydrological regulation; such studies have played an important role in furthering the understanding of the processes and mechanisms of the hydrological regulation service in the ecosystem. At the basin scale, hydrological regulation services were affected comprehensively by many factors, including ecosystem characteristics, water conservancy facilities, water used by humans, and so on, and these influences have scale effects. Presently, owing to the lack of comprehensive studies of the systematic

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-ZY-004);国家重点研发计划项目(2016YFC0503401)
收稿日期:2017-01-08;　　**网络出版日期**:2017-09-14
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhenghua@ rcees.ac.cn

ecosystem at the river scale, it is still difficult to evaluate ecosystem effects on regional hydrological processes from a macro perspective. In addition, few studies have explored how to represent and understand ecosystem water regulation services at the river scale as well as to identify influential factors that have differing effects on the water regulation service of the ecosystem at the river scale. Thus, a study on the space variation regularity of hydrological regulation services and its diving force is necessary. We used as a case study the Yangtze River Basin, where flooding occurs frequently, as to study the spatial patterns of ecosystem hydrological regulation services and factors affecting it, by using the variation coefficient method and multi-variable statistics methods. The results showed that, in the Yangtze River Basin, ecosystem hydrological regulation services presented significant spatial heterogeneity at the sub-watershed scale. The sub-watersheds in Jinshajiang and Hanjiang watersheds, where dense hydropower engineering facilities are located and the coverage of natural vegetation is 71%, had the highest regulating capacity of hydrology. The difference between the coefficients of variance of precipitation and runoff was 0.477. In contrast, sub-watersheds with high population density and high proportion of cropland in Jialingjiang watershed had the lowest regulating capacity of hydrology and the difference between the coefficients of variance of precipitation and runoff was −0.474. The factors primarily affecting sub-watershed ecosystem hydrological services include reservoir volume, natural vegetation proportion, cropland proportion, and population density. Reservoir volume and natural vegetation proportion had positive effects on sub-watershed ecosystem hydrological services, while cropland proportion and population density had negative effects. Reservoir volume had the highest contribution to the heterogeneity of sub-watershed ecosystem hydrological services (58.85%). Our results facilitate a better understanding of the spatial heterogeneity of sub-watershed ecosystem hydrological services in Yangtze River Basin, and could also provide a scientific basis for sub-water ecosystem conservation and restoration, as well as the improvement of sub-watershed ecosystem hydrological regulation services.

Key Words: hydrological regulation service; variation coefficient method; ecosystem services; sub-watershed scale; Yangtze River Basin

生态系统的水文调节服务是生态系统对自然界中水的各种运动变化所发挥的作用,表现为通过生态系统对水的利用、滤过等影响和作用以后,水在时间、空间、数量等方面发生变化的现象和过程[1]。生态系统通过蒸散和利用消耗水资源、截留等方式改变水的时间和空间分配特征,导致水文情势发生变化,从而产生有利(如:调节洪峰、增加枯水季节径流)或不利(如:加剧洪涝和干旱灾害)的影响。研究生态系统水文调节服务可为生态水文格局的合理构建和水资源的持续利用提供理论支持[2]。

在生态系统和景观尺度,许多学者围绕不同植被类型和景观格局对水文调节服务的影响开展了大量研究[3-5],森林植被能够影响水文过程、促进降雨再分配、影响土壤水分运动以及改变产流汇流条件等,从而缓和地表径流,增加土壤径流和地下径流,在一定程度上起到了削峰补枯、控制土壤侵蚀、改善河流水质等作用[6]。植被变化、农业开发活动、道路建设以及城镇化等土地利用变化也对水文调节服务产生显著影响[7]。部分研究还认为:水利工程建设对削减洪峰、增加枯水季径流发挥一定的作用[8-10]。这些生态系统或景观尺度上的研究对于认识生态系统水文调节过程或机理发挥了重要作用。在流域尺度上,生态系统水文调节服务受到生态系统特征、水利工程设施和人类用水等多个因素的综合影响,并且这些影响存在尺度效应[1,6-7],现阶段,由于缺乏系统的流域尺度生态水循环过程的综合观测,从宏观角度评估生态系统对区域水文过程的影响仍存在较大难度[11]。如何表征和认识流域尺度上生态系统水文调节服务特征、辨识不同影响因素对流域尺度生态系统水文调节服务的作用,仍然研究很少。

本研究以我国面积最大、降雨时空分布不均、洪涝灾害频发的长江流域为对象,以平水年 2013 年为基础,基于降雨-地表径流同步性特征研究子流域尺度上长江流域生态系统水文调节服务的空间格局以及影响因素,其目标是:揭示长江流域生态系统水文调节服务的空间特征,阐明导致长江流域生态系统水文调节服务空

间差异的主要因素及其相对贡献,为长江流域生态系统水文调节服务管理提供基础信息。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

长江流域地处中国南部(24°—35°N,90°—122°E),全长 6280 km,流域面积 180 万 km^2(图 1)。流域受季风性气候影响降雨丰富但相对集中且时空分布不均,流域水源总量约为 9960 亿 m^3,占全国 35%以上[12],居全国首位,但人均占有量还处于较低水平。雨季容易出现洪涝灾害,平均约 10 年发生一次大洪水。如 1998 年长江流域发生特大洪水灾害;2007 年,整个四川盆地在 7 月经历半个月的大暴雨,100 多万人受灾;2010 年 7 月,长江流域境内江苏、江西、湖北、湖南、重庆、四川等多省市遭受暴雨洪涝灾害。在枯水季来水较少时很容易出现季节性缺水,如 2006 年川渝大旱部分县持续干旱超过 80 d,三分之二的溪河断流,471 座水库干涸;2011 年 4 月下旬至 5 月中旬,长江中下游地区出现重度以上气象干旱,部分县市一度达到特旱等级[13]。

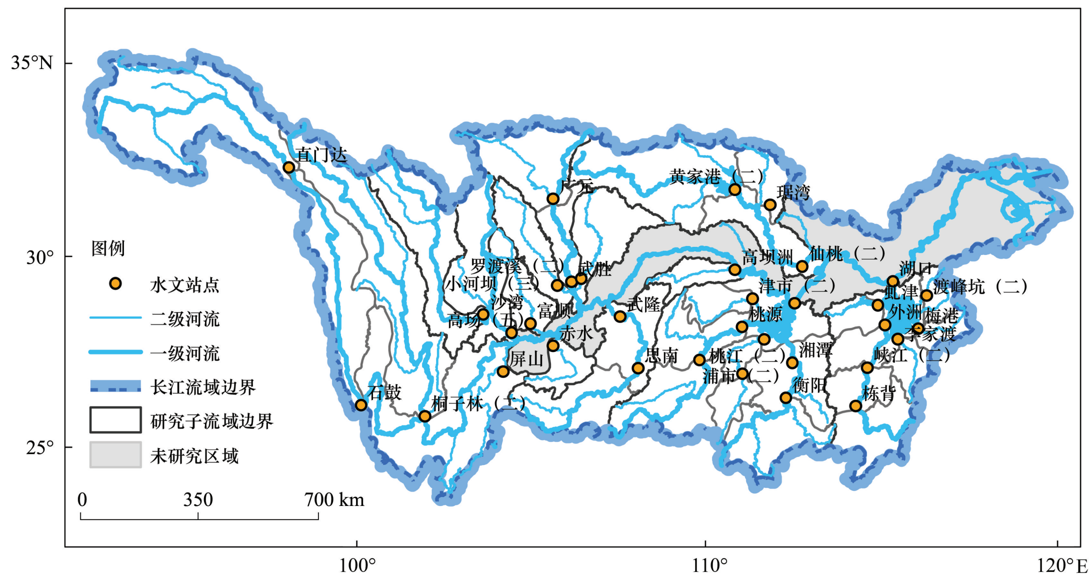


图 1 长江流域水系及水文站分布图

Fig.1 Water system and hydrologic distribution in Yangtze River Basin

1.2 研究方法

1.2.1 水文调节服务表征方法

生态系统对降雨-径流过程的所有影响都可以称为水文调节,例如降水-径流关系、径流过程的延迟、流域的蓄渗能力。本研究采用与江河径流过程密切相关的变异系数法表征流域尺度上生态系统对水文过程的调节作用。其基本假设是:在无任何自然和人为干扰情况下,降雨过程与地表径流过程具有高度同步性,降雨与河流径流的年内变异系数差异较小。但自然与人为影响会导致降雨与河流径流的变异系数产生差异,二者差值($CV_p - CV_R$)的正负号表明径流年内变化相对降雨更为平稳或离散,二者差值($CV_p - CV_R$)大小表明径流相对降雨离散性变化的幅度,即水文调节的幅度。

$$CV_p = \frac{\sigma}{\bar{P}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}(P_i - \bar{P})^2}}{\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}P_i}$$

$$CV_R = \frac{\sigma}{\bar{R}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}(R_i - \bar{R})^2}}{\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12} R_i}$$

式中: P_i 为各月降雨量, $\bar{P}$ 为年均降雨量; R_i 为各月径流量; $\bar{R}$ 为年均径流量。CV_p值越大即表明年内各月降雨量相差悬殊,降雨年内分配越不均匀;同样,CV_R值越大,表明径流年内分配越不均匀。

1.2.2　水文调节功能影响因素选择

人类活动对生态系统水文调节服务的影响主要通过改变下垫面类型(即:土地利用与覆盖类型)、水利工程设施和社会经济发展的用水[14-16]。本研究据此选择自然植被(草地+灌丛+森林)覆盖比例、农田面积比例代表主要的土地覆盖因子;选择水库库容代表水利工程设施因子;选择单位面积人口代表社会经济因子,探讨不同因子对长江流域生态系统水文调节服务空间差异的相对影响。

1.2.3　数据收集与统计分析

子流域划分:基于长江水利委员会对流域的划分,选取每个子流域出水口水文站所控制的流域为研究区,形成 34 个评价单元(图 1)。

降雨与径流数据:为了使研究不受极端气候的影响,参照中国水资源公报[17]选取平水年 2013 年作为研究时段。收集了 2013 年长江流域 148 个气象台站降雨数据,采用普通克里格方法对流域降水进行空间插值,形成 12 个月面降雨量数据。

自然与社会数据:2010 年生态系统数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所;水库库容数据来源于现有水利工程统计数据、人口数据来源于中国农科院农业信息研究所。

统计分析:采用主成分分析和线性回归相结合的方法,建立自然地理因素(自然植被比例(X_1))、人类活动(库容(X_2)、农田比例(X_3)、单位面积人口(X_4))与水文调节服务回归模型,分析自然地理因素和人类活动对水文调节服务的影响;对影响水文调节服务的 4 个因素进行主成分分析,提取主要成分,主成分需要反映原始指标 80%以上的变异信息。使用提取的主成分与因变量进行回归,建立主成分与因变量回归模型,然后将主成分还原成最初自变量得到初始自变量与因变量回归模型($CV_p - CV_R = 0.00100X_1 + 0.19410X_2 - 0.14506X_3 - 0.00027X_4 - 0.06439$, $R^2 = 0.327$, $F = 7.531$)。

运用相对贡献率的算法计算各影响因素的重要性大小,其主要思想是计算回归模型中每添加一个因子引起 R^2变化的近似值,具体计算方法见参考文献[18-19]。

2　结果与分析

2.1　降雨与径流的空间分布

2013 年是平水年,长江流域各地区年降雨量约为 300—1700 mm。受季风气候和地形的影响,整个流域年降水量空间分布并不均匀,年降雨量由东南向西北递减。降雨集中在东南部沿海地区及成都平原,金沙江上游、汉江上游降雨相对较少(图 2)。

长江东南区的流域降雨变异系数较西北区低,变异系数在 0.83 以下,即东南区的流域降雨年内分配要比西北区的更加均匀。青衣江、岷江干流、涪江和嘉陵江干流降雨年内分配极不均匀,变异系数大于 1(图 2)。

长江属于雨源性河流,径流十分丰富。径流深度大多在 300—800 mm 之间,分布在流域的东南部、雅砻江、大渡河和嘉陵江流域。径流深低于 300 mm 的流域分布在金沙江、汉江和赤水河,属于水资源相对匮乏的区域(图 3)。

径流的年内分布离散性空间变异较大,径流变异系数变动范围在 0.26—1.65 之间。下游的汉江、洞庭湖、鄱阳湖径流年内分布比较均匀,沱江和嘉陵江水系径流变异系数较大,变异系数大于 1,径流年内分布极不均匀(图 3)。

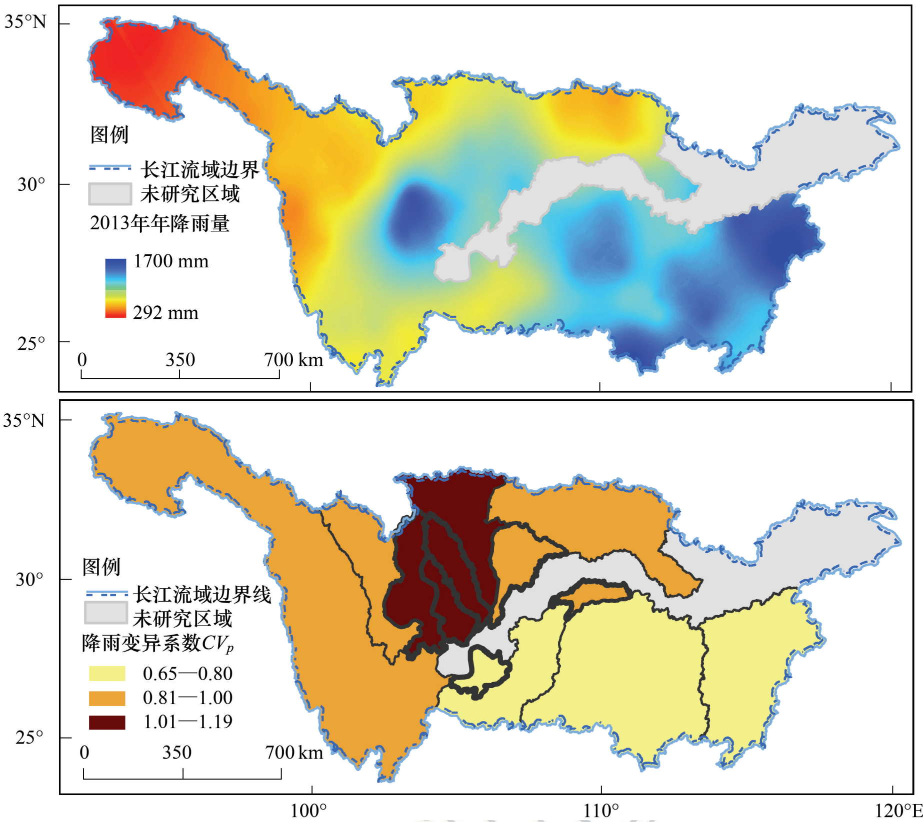


图 2 长江流域 2013 年降雨量分布与降雨年内分配变异系数空间分布

Fig.2 Rainfall distribution and rainfall coefficient of variation distribution in Yangtze River Basin

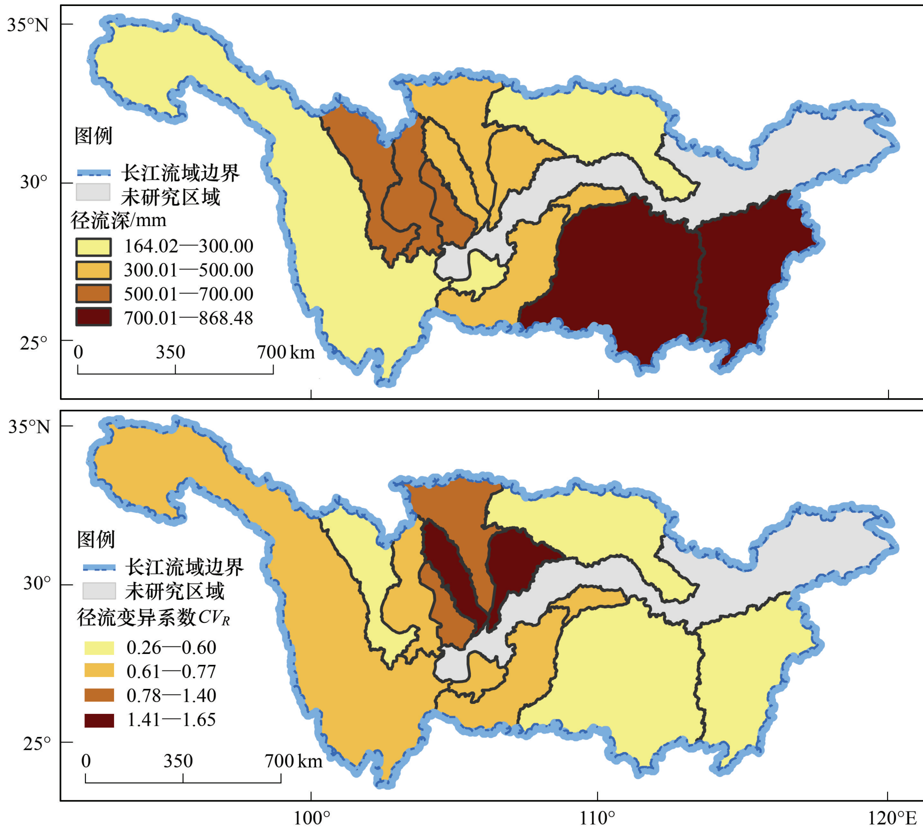


图 3 长江流域 2013 年径流深度空间分布与径流年内分配变异系数空间分布

Fig.3 Runoff distribution and runoff coefficient of variation distribution in Yangtze River Basin

2.2　水文调节服务空间特征

长江流域自西向东各子流域水文调节功能呈现出明显的空间异质性。长江流域源区和上游地区降雨和径流变异系数差异较大,下游地区径流相对降雨变幅较小,即水文调节服务主要作用地区在中上游地区(图 4)。通过对水文服务表征指标聚类分析可以看出,水文调节服务可分为 3 类,一类是嘉陵江水系;第二类是金沙江以上的长江源区和汉江水系,剩下的流域形成第三类,且第三类与第一类更为相似(图 5)。

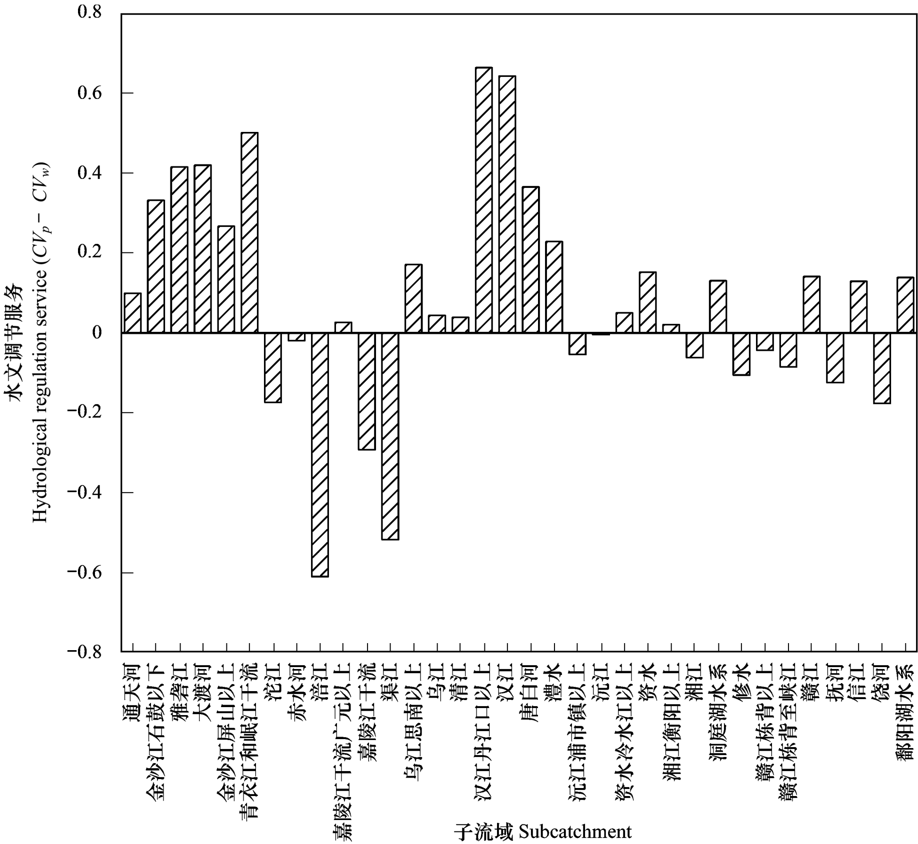


图 4　长江流域水文调节服务分布

Fig.4　Hydrological regulating service distribution in Yangtze River Basin

2.3　水文调节服务的影响因素

自然地理要素和人类活动均对自流域尺度水文调节服务产生影响。水库库容和自然植被面积比例对水文调节服务具有正向促进作用,而农田面积比例和单位面积人口对水文调节服务的作用正好相反。研究区域内水库库容、自然植被面积比例、农田面积比例和单位面积人口均对长江流域子流域水文调节服务的空间异质性产生影响:水库库容对水文调节服务空间变异的贡献率最大(58.55%);其次是农田面积比例(18.79%),自然植被面积比例和单位面积人口对水文调节服务空间变异的贡献率均在 10%左右(图 6)。

3　讨论

研究区域内表征流域尺度生态系统水文调节服务的 CV_p-CV_R均值为 0.085,但长江流域生态系统水文调节服务呈现出明显的空间异质性:水文调节服务最强的子流域位于长江源区和汉江水系,在水文调节作用下该子流域径流年内分配趋于平坦(CV_p-CV_R为 0.477);水文调节服务最弱的子流域位于嘉陵江水系(涪江、渠江和嘉陵江干流),降雨径流的变异系数远远大于降水(CV_p-CV_R均值为−0.474);长江中下游地区各子流域水文调节服务不明显(CV_p-CV_R均值为 0.033)(图 4,图 5)。

长江流域各子流域生态系统水文调节服务影响因素主要包括水库库容、农田面积比例、自然植被面积比

例和单位面积人口，但在不同子流域影响生态系统水文调节服务的主导因素各不相同。(1)第一类嘉陵江流域生态系统水文调节服务主要影响因素是农田面积比例和单位面积人口，农田面积比例高达39.80%，人口分布密集(280 人/km^2)，导致水文调节服务弱。水源涵养功能是森林生态系统服务功能的重要组成部分，通过测评秦巴山区植被涵养水源总物质量为 33.82 × 10^8 t/a，其中林冠截流量 10.99×10^8 t/a，枯枝落叶截流量 3.20×10^8 t/a，土壤截留量 19.63×10^8 t/a[20]。因而在嘉陵江流域，可以通过恢复植被提高水文调节服务作用。(2)第二类长江源区和汉江水系生态系统水文调节服务主要影响因素是水库库容和自然植被面积比例。水库的调蓄功能能直接改变坝下河道的径流量季节分配方式，丹江口水库从1968年蓄水以后，汛期径流量大幅减少，枯水季节流量增加，即使最枯的月份也能有 20×10^8 m^3 左右的水量[15]。长江源区和汉江流域水库库容(162.497×10^{12} m^3)远远超过了全流域平均水平，加上最高的自然植被覆盖率(71.14%)，因而水文调节服务作用最强。(3)第三类长江中下游地区各子流域较高的人口密度(230 人/km^2)和农田面积比例(24.10%)导致生态系统水文调节服务较弱。

本研究也还存在一些不足：变异系数只能代表降雨和径流的离散程度，不能明确降雨和径流极值出现的时间和大小，还需要其他辅助指标才能进一步描述水文调节过程；此外，将库容作为一个因子探讨水电开发与流域水文调节服务的关系，但未考虑水库不同调节方式对水文调节服务的影响，进一步结合水库调节方式才能充分阐明水库的水文调节服务，例如：在嘉陵江流域，尽管水库库容量较大(67.2×10^{12} m^3)，但水库削峰补枯的作用发挥很小，原因一方面是渠江、沱江流域存在通过水库进行流域间引水如引大济岷，加大了径流的变异，另一方面水库的调节方式决定了水利工程的调节作用，如径流式水库对径流的年内分配影响较小。渠江、涪江7月份径流量的比例远远大于降雨量的比例(图7)，表明水库在此流域枯水期几乎没有调节作用可见，因此水库的水文调节服务效用与水库调节方式有密切关系；另外，将自然植被覆盖比例作为一个因子没有考虑不同植被类型的水源涵养能力差异性，例如本研究中自然植被包含森林、灌从、和草地三种土地利用模式，而相关研究表明这三种植被类型持水量有差异。张学龙等在祁连山寺大隆林区监测数据分析结果显示，各类林地的年平均持水量以灌丛林最高，为 391.92 mm；其次是云杉林、圆柏林，分别为 324.82 mm 和 298.25 mm；牧坡草地最少，为 180.29 mm[21]。

平均联接(组间)的树状图
重新调整距离聚类合并

Y	0	5	10	15	20	25
信江						
洞庭湖水系						
赣江						
鄱阳湖水系						
资水						
乌江思南以上						
通天河						
金沙江屏山以上						
澧水						
沱江						
饶河						
修水						
抚河						
赣江栋背至峡江						
嘉陵江干流广元以上						
湘江衡阳以上						
乌江						
清江						
资水冷水江以上						
沅江						
赤水河						
沅江浦市镇以上						
湘江						
赣江栋背以上						
汉江丹江口以上						
汉江						
雅砻江						
大渡河						
金沙江石鼓以上						
唐白河						
青衣江和泯江干流						
涪江						
渠江						
嘉陵江干流						

图5 长江流域水文调节功能聚类图

Fig.5 Dendrogram of Yangtze River Basin hydrological regulating service

图6 长江流域生态系统水文调节功能空间变异相对贡献率

Fig.6 Relative importance of hydrological regulating service in Yangtze River Basin

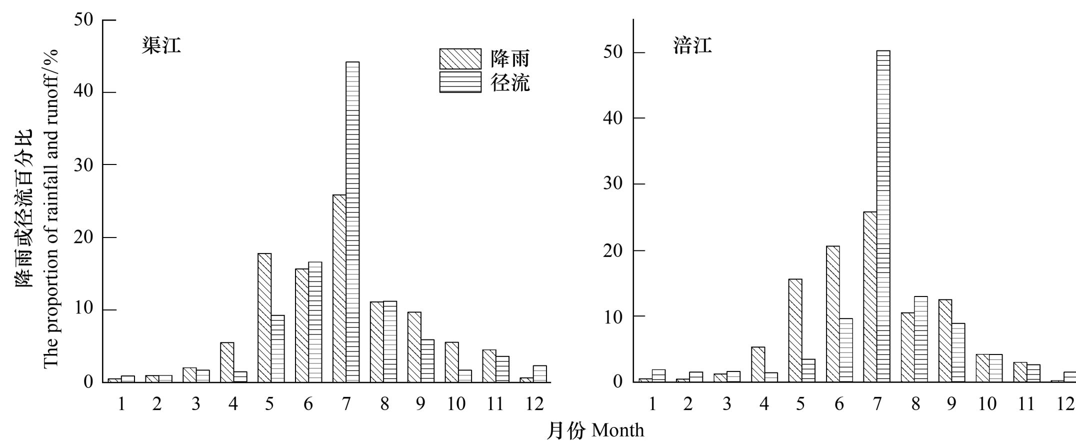


图 7　嘉陵江水系月降雨量比例和月径流比例图

Fig.7　The proportion of rainfall and runoff in Jialing River Basin

本研究在揭示长江流域子流域尺度上生态系统水文调节服务空间特征基础上,研究结果也可为流域生态保护与恢复、生态系统水文调节服务提升提供科学依据。(1)在长江源区和汉江水系,水库库容和自然植被面积比例最高,导致生态系统水文调节服务最强。尽管研究表明水库和自然植被对于水文调节服务都具有正向促进作用,但其生态学机制和效用有明显差异。森林调节是自然调节过程,不会对河流连通性,鱼类洄游和湿地候鸟栖息地产生不利影响,与水利工程调节相比,自然植被调节更加突出,需要更加重视。表明:在长江源区和汉江流域需要加强自然生态系统保护与恢复,同时需要关注大坝建设的负面效应。尽管水利工程建设增强了生态系统水文调节服务,但一方面,由于水库拦截,河流流速减慢,河水自净能力被削弱,水质遭到破坏。研究表明,攀枝花市在建库前取水口的饮用水水源一级保护区内 COD 和氨氮水质均能达标,观音岩电站和金沙、银江电站建库后,位于金沙库区的精煤公司水厂和陶家渡水厂的饮用水水源 COD 有超标现象[22];另一方面,水坝建成后,破坏了河流生物原有栖息环境。上游河段由激流、缓流与回水塘等多样化的流水型生境,演变成河面宽阔、深度变浅、水流缓慢的湖泊型水域,适合湍蛙等栖息的激流生境消失了,而适于缓流生活的大齿蟾和华西蟾蜍在水坝上游大量繁殖[23]。此外,水库修建还改变了下游河道的流量过程。水库不仅存蓄了汛期洪水,而且还截流了非汛期基流,往往会使下游河道水位大幅度下降甚至断流[24]。据湖南省水文局 2016 年 12 月 11 日分析,长江入洞庭湖水量锐减 9 成,长江三口河系基本断流,其中藕池河康家嘴站断流达 279 d[25]。(2)嘉陵江流域由于最高的农田面积比例和最高人口密度,导致生态系统水文调节功能最弱。在这些流域内需要加强自然植被的恢复、调控人类活动对生态系统水文调节功能的影响,提升生态系统水文调节功能。长江中下游流域也需通过上述生态保护与恢复措施增强生态系统水文调节功能。

参考文献(References):

[1] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.

[2] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展. 生态学报, 2003, 23(3): 580-587.

[3] 杨国靖, 丁永建, 肖笃宁. 干旱区山地典型流域不同景观结构的水文调节能力分析. 冰川冻土, 2005, 27(5): 701-708.

[4] 肖笃宁, 裴铁凡, 赵羿. 辽河三角洲湿地景观的水文调节与防洪功能. 湿地科学, 2003, 1(1): 21-25.

[5] 曹云. 红壤丘陵区不同森林恢复类型水文调节功能的机制研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2007.

[6] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529-534.

[7] Bronstert A, Niehoff D, Bürger G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. Hydrological Processes, 2002, 16(2): 509-529.

[8] Yang Z S, Wang H J, Saito Y, Milliman J D, Xu K, Qiao S, Shi G. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: the past 55 years and after the Three Gorges Dam. Water Resources Research, 2006, 42(4): W04407.

[9] Yin H, Li C G. Human impact on floods and flood disasters on the Yangtze River. Geomorphology, 2001, 41(2/3): 105-109.

[10] Zeilhofer P, de Moura R M. Hydrological changes in the northern Pantanal caused by the Manso dam: impact analysis and suggestions for mitigation. Ecological Engineering, 2009, 35(1): 105-117.
[11] 王根绪, 李娜, 胡宏昌. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 202-208.
[12] 常福宣. 长江流域水资源配置的几个关键问题思考. 长江科学院院报, 2011, 28(10): 54-58.
[13] 陈鲜艳, 周兵, 钟海玲, 柳艳菊. 2011 年长江中下游春旱的气候特征分析. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 139-145.
[14] 徐光来, 许有鹏, 徐宏亮. 城市化水文效应研究进展. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2171-2178.
[15] 张俊宏. 丹江口水库下游河道对汉江调水响应机制及航道整治对策研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
[16] 郭旭宁, 胡铁松. 农田流域水文响应特征分析及模型考虑. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 26-29.
[17] 中华人民共和国水利部. 2013 年中国水资源公报. 北京: 中华人民共和国水利部, 2013.
[18] 郭呈全, 陈希镇. 主成分回归的 SPSS 实现. 统计与决策, 2011, (5): 157-159.
[19] Kabacoff R I. R 语言实战. 高涛, 肖楠, 陈钢, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 194-196.
[20] 任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值测评. 地理学报, 2003, 58(4): 503-511.
[21] 张学龙, 车克钧, 王金叶, 闫文德, 张虎. 祁连山寺大隆林区土壤水分动态研究. 西北林学院学报, 1998, 13(1): 1-9.
[22] 阮娅, 肖彩. 金沙江攀枝花河段水电开发对水质影响的分析. 人民长江, 2009, 40(20): 81-84.
[23] 李成, 顾海军, 戴强, 刘志君, 王跃招. 草坡河流域小水电开发对无尾两栖动物的影响. 长江流域资源与环境, 2008, 17(S1): 117-121.
[24] 曹永强, 倪广恒, 胡和平. 水利水电工程建设对生态环境的影响分析. 人民黄河, 2005, 27(1): 56-58.
[25] 《长江流域资源与环境》编辑部. 长江入洞庭湖水量锐减 9 成. (2016-12-15) [2017-01-04]. http://changjiang.whlib.ac.cn/changjlyhp/dongth/201312/t20131226_7016.htm.